

عنوان مقاله: ارائه یک مدل ریاضی دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت و انتشار کربن

نویسنده اول: آراین دیندارمهر

۱- گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران - (ایمیل: aryan_dindar@ind.iust.ac.ir)

خلاصه

در سال‌های اخیر، توجه به مسائل زیست محیطی و الزامات قانونی، شرکت‌ها را به سمت طراحی زنجیره های تامین حلقه بسته سوق داده است. این مقاله به ارائه یک مدل ریاضی دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت می پردازد. اهداف مدل شامل کمینه سازی هزینه های کل شبکه (شامل هزینه های حمل و نقل، راه اندازی تسهیلات، تولید و بازیافت) و کمینه سازی میزان انتشار گاز های گلخانه ای است. برای مواجهه با عدم قطعیت در پارامترهایی نظیر تقاضا و نرخ بازگشت محصولات، از رویکرد بهینه سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از روش محدودیت افسیلون تقویت شده حل شده و نتایج حاصل از اجرای آن در یک مطالعه موردی در صنعت لوازم الکترونیکی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: زنجیره تامین حلقه بسته، مدل سازی ریاضی، بهینه سازی چند هدفه، عدم قطعیت، انتشار کربن

۱- مقدمه

رشد جمعیت، افزایش مصرف منابع و تشدید قوانین زیست محیطی، تولیدکنندگان را بر آن داشته است تا علاوه بر جریان رو به جلو (تامین، تولید، توزیع)، به جریان معکوس (بازگرداندن، بازیافت، دفع) محصولات نیز توجه ویژه ای داشته باشند. زنجیره تامین حلقه بسته با یکپارچه سازی این دو جریان، علاوه بر کاهش هزینه ها از طریق استفاده مجدد از مواد، به کاهش اثرات مخرب زیست محیطی نیز کمک می کند. از سوی دیگر، عدم قطعیت در پارامترهای کلیدی مانند تقاضای مشتریان و کیفیت و کمیت محصولات بازگشتی، طراحی چنین شبکه هایی را با چالش مواجه می سازد. در این پژوهش، یک مدل ریاضی دو هدفه ارائه می شود که ضمن در نظر گرفتن هم زمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی، عدم قطعیت پارامترها را نیز پوشش می دهد.

۲- پیشینه تحقیق

پژوهش های متعددی در زمینه طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در دو دهه اخیر انجام شده است. این مطالعات را می توان از جنبه های مختلف شامل نوع مدل (تک هدفه، چند هدفه)، رویکرد مواجهه با عدم قطعیت، ملاحظات زیست محیطی، و روش های حل طبقه بندی نمود.

۱-۲ مدل های قطعی و تک هدفه

مطالعات اولیه در این حوزه عمدتاً بر بهینه سازی تک هدفه با فرض قطعی بودن پارامترها متمرکز بودند. فراهمی یک مدل تک هدفه با هدف کمینه سازی هزینه ها در زنجیره تامین حلقه بسته ارائه داد که در آن پارامترهای تقاضا و بازگشت محصولات به صورت قطعی در نظر گرفته شده بودند [۱]. اگرچه این مدل ها پایه گذار مفاهیم اولیه بودند، اما به دلیل نادیده گرفتن نوسانات واقعی بازار، کاربرد عملی محدودی دارند.

۲-۲ مدل های چند هدفه و ملاحظات زیست محیطی

با افزایش نگرانی های زیست محیطی و تصویب قوانین سختگیرانه تر در مورد انتشار کربن، پژوهشگران به تدریج به سمت مدل های چند هدفه گرایش پیدا کردند. پاداپولوس و همکاران به بررسی اثرات زیست محیطی در زنجیره تامین پرداختند و نقش داده های حجیم در بهبود عملکرد زیست محیطی را تحلیل نمودند، اما مدل ارائه شده توسط آن ها فاقد رویکرد سیستماتیک برای مواجهه با عدم قطعیت بود [۲]. مطالعات بن جایفر و همکاران از جمله پژوهش های بنیادین در زمینه اثرگذاری سیاست های کربن بر مدیریت زنجیره تامین محسوب می شود که نشان داد اعمال محدودیت های کربن می تواند منجر به باز پیکر بندی شبکه توزیع شود [۳].

در سال های اخیر، مدل های پیشرفته تری با در نظر گرفتن هم زمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی توسعه یافته اند. ماردان و همکاران با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز به حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز پرداختند [۴]. همچنین یواری و همکاران مدلی برای انتخاب هم زمان تامین کننده و پیکر بندی شبکه در زنجیره تامین حلقه بسته سبز تحت عدم قطعیت ارائه کردند. [۵]. مطالعات لطفی و همکاران نیز با رویکرد بهینه سازی استوار و در نظر گرفتن معیار ارزش در معرض خطر شرطی، به طراحی زنجیره تامین حلقه بسته پایدار و تاب آور پرداخته اند [۶].

۳-۲ رویکرد های مواجهه با عدم قطعیت

عدم قطعیت در پارامترهای کلیدی مانند تقاضا، نرخ بازگشت و کیفیت محصولات بازگشتی، یکی از چالش های اساسی در طراحی زنجیره تامین حلقه بسته است. مطالعه مروری ووب و همکاران با بررسی ۲۱۸ مقاله در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ نشان داد که رویکردهای فازی، بهینه سازی استوار و برنامه ریزی تصادفی، سه روش اصلی برای مواجهه با عدم قطعیت در زنجیره های تامین حلقه بسته هستند [۷].

پیشوایی و همکاران یکی از اولین پژوهشگرانی بودند که از برنامه ریزی ریاضی فازی چند هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین سبز استفاده کردند [۸]. در ادامه، فضلی خلف و همکاران مدل ترکیبی فازی-تصادفی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز قابل اعتماد ارائه دادند [۹]. عبدالعظیمی و همکاران نیز با در نظر گرفتن تحویل به موقع، هزینه و جنبه های زیست محیطی، یک مدل استوار برای طراحی زنجیره تامین حلقه بسته چند هدفه توسعه دادند و آن را در یک مطالعه موردی در صنعت تایر پیاده سازی کردند [۱۰].

رویکرد بهینه سازی استوار برتسیماس و سیم که در پژوهش فازی خلف و همکاران (۲۰۲۴) نیز به کار گرفته شده، امکان کنترل سطح محافظه کاری تصمیم گیرنده را فراهم می کند و نسبت به رویکرد های سنتی استوار، انعطاف پذیری

بیشتری دارد [۱۱].

۴-۲ مدل‌های نوین با رویکرد های ترکیبی

جدید ترین پژوهش ها در این حوزه به سمت یکپارچه سازی مفاهیم مختلف و استفاده از رویکرد های ترکیبی حرکت کرده اند. چنگ و همکاران یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای بهینه سازی هم زمان عملیات زنجیره تامین سبز و تصمیمات مالی با در نظر گرفتن سرمایه گذاری در کاهش انتشار کربن ارائه دادند. نتایج پژوهش آن ها نشان داد که قیمت سهمیه کربن و ترجیحات سبز مصرف کنندگان تأثیر مثبت بر سود آوری و کاهش انتشار کربن در زنجیره تامین دارند [۱۲].

همچنین مطالعه مروری یونیارتی و همکاران با تحلیل ۵۲۸ مقاله منتشر شده بین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵، پنج خوشه موضوعی اصلی در طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار و تاب آور شناسایی کرده است: (۱) دیجیتالی سازی برای تصمیم گیری پایدار، (۲) اولویت های انرژی و زیست محیطی در زنجیره های تامین کم کربن، (۳) تاب آوری و برنامه ریزی استراتژیک تحت عدم قطعیت، (۴) زنجیره های تامین معکوس داده محور، و (۵) بهینه سازی ابتکاری در سیستم های سبز و حلقه بسته [۱۳].

در زمینه زنجیره تامین حلقه بسته تجارت الکترونیک، لی و همکاران یک مدل بهینه سازی استوار دو هدفه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا، بازگشت و ریسک اختلال ارائه کردند. آن ها با ترکیب الگوریتم Prim^۱ و NSGA-II^۲، الگوریتم جدید Prim-NSGAI را توسعه دادند که شاخص IGD^۳ را ۳۹.۳٪ و شاخص SM^۴ را ۶۹.۱٪ بهبود بخشید [۱۴].

۵-۲ شکاف تحقیقاتی و نوآوری پژوهش

مرور پیشینه تحقیق نشان می دهد که علی رغم پیشرفت های قابل توجه، شکاف های تحقیقاتی مهمی همچنان وجود دارد. مطالعات مروری نشان می دهند که پژوهش های موجود عمدتاً بر مدل های قطعی متمرکز بوده و رویکرد های تصادفی کمتر مورد توجه قرار گرفته اند. همچنین یکپارچه سازی هم زمان عدم قطعیت در پارامتر های متعدد (تقاضا، بازگشت) با ملاحظات زیست محیطی در تمام سطوح شبکه (تولید، حمل و نقل، بازیافت) کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

نسبت به کارهای پیشین، ارائه یک مدل یکپارچه دو هدفه با در نظر گرفتن هم زمان عدم قطعیت پارامترها (با رویکرد استوار مبتنی بر سناریو) و انتشار کربن در تمام سطوح شبکه (تولید، حمل و نقل و بازیافت) می باشد. مدل پیشنهادی ضمن پوشش کامل جریان های مستقیم و معکوس، قادر است با استفاده از روش محدودیت افسیلون تقویت شده، مجموعه جواب های پارتو را برای ایجاد تعادل بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی ارائه دهد.

در جدول ۱، خلاصه ای از مهم ترین پژوهش های مرتبط با موضوع ارائه شده است.

^۱ الگوریتم پرایم

^۲ الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (نسخه دوم)

^۳ فاصله معکوس نسلی (Inverted Generational Distance)

^۴ گستره یا شاخص فاصله گذاری (Spacing Metric)

جدول ۱- جدول مرور ادبیات

مطالعه موردی	حلقه بسته	ملاحظات زیست محیطی	نوع قطعیت			نوع مدل			شماره مرجع	سال انتشار	نویسندگان	
			غیر قطعی			قطعی	کیفی یا مروری	چند هدفه				تک هدفه
			بررسی روش ها	استوار	فازی							
		*				*			*	[۱]	۲۰۲۰	Farahani et al.
*		*				*	*			[۲]	۲۰۲۱	Papadopoulos et al.
		*				*			*	[۳]	۲۰۱۲	Benjaafar et al.
	*	*				*		*		[۴]	۲۰۱۹	Mardan et al.
*	*	*			*			*		[۵]	۲۰۱۸	Yavari & Zaker
	*	*		*				*		[۶]	۲۰۲۰	Lotfi et al.
		*			*			*		[۷]	۲۰۱۲	Pishvae & Razmi
	*	*		*	*			*		[۸]	۲۰۱۷	Fazli-Khalaf et al.
*	*	*		*				*		[۹]	۲۰۲۰	Abdolazimi et al.
	*	*	*				*			[۱۰]	۲۰۲۵	Wube et al.
		*				*			*	[۱۱]	۲۰۲۵	Cheng et al.
	*	*	*				*			[۱۲]	۲۰۲۵	Yuniarti et al.
*	*	*		*				*		[۱۳]	۲۰۲۵	Li et al.
				*			*			[۱۴]	۲۰۰۴	Bertsimas & Sim
						*	*			[۱۵]	۲۰۰۹	Mavrotas
					*		*			[۱۶]	۱۹۷۸	Zimmermann
*	*	*		*				*			۲۰۲۵	پژوهش حاضر

بررسی جدول ۱ نشان می دهد که اگرچه پژوهش های متعددی به بهینه سازی زنجیره تامین پرداخته اند، اما تعداد معدودی از آن ها هم زمان به اهداف اقتصادی و زیست محیطی توجه داشته و از رویکرد استوار برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده کرده اند. همچنین پیاده سازی در صنعت لوازم الکترونیکی با در نظر گرفتن انتشار کربن در تمام سطوح شبکه، از ویژگی های متمایز پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین می باشد.

۶-۲ جمع بندی پیشنهادی تحقیق

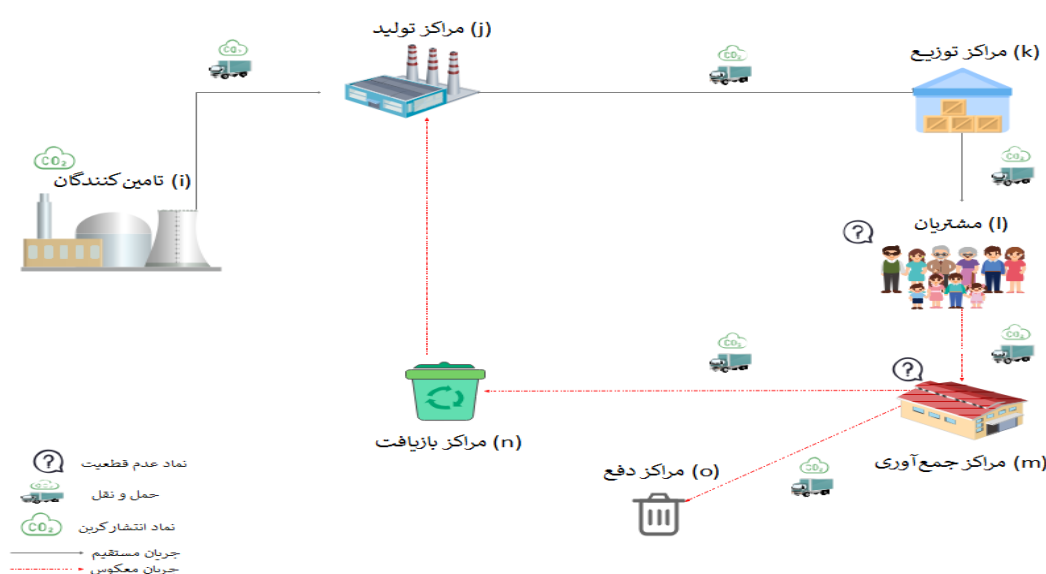
مرور ادبیات نشان می دهد که علیرغم پژوهش های متعدد در زمینه زنجیره تامین حلقه بسته، مدل یکپارچه ای که هم زمان عدم قطعیت به روش استوار مبتنی بر سناریو، انتشار کربن در تمام سطوح شبکه و اهداف دوگانه اقتصادی-زیست محیطی را پوشش دهد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. جدول ۱ خلاصه ای از مهم ترین پژوهش های مرتبط را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، پژوهش حاضر با در نظر گرفتن هم زمان این جنبه ها و پیاده سازی در صنعت لوازم الکترونیکی، شکاف موجود را پوشش می دهد.

۳- مدل ریاضی مسئله

۱-۳ تعریف مسئله

شبکه زنجیره تامین حلقه بسته مورد نظر در شکل ۱ نمایش داده شده است. این شبکه شامل سطوح زیر است: تامین کنندگان، مراکز تولید، مراکز توزیع، مشتریان، مراکز جمع آوری، مراکز بازافت و مراکز دفع.

شکل ۱ - ساختار شبکه زنجیره تامین حلقه بسته مورد بررسی



در جریان مستقیم (فلش های مشکی)، مواد اولیه از تامین کنندگان به مراکز تولید ارسال می شوند. محصولات جدید تولید شده از مراکز تولید به مراکز توزیع و در نهایت به مشتریان ارسال می گردند. در جریان معکوس (فلش های قرمز خط چین)، محصولات مستعمل از مشتریان به مراکز جمع آوری باز می گردند. در مراکز جمع آوری، این محصولات بر اساس نرخ بازیافت به دو دسته تقسیم می شوند: محصولات قابل بازیافت به مراکز بازیافت ارسال شده و محصولات غیرقابل بازیافت به مراکز دفع فرستاده می شوند. در نهایت، مواد بازیافتی تولید شده در مراکز بازیافت، دوباره به چرخه تولید بازگردانده می شوند و حلقه زنجیره تامین تکمیل می گردد. نماد های انتشار کربن نقاطی را نشان می دهند که در تابع هدف دوم (کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه ای) مورد توجه قرار گرفته اند. انتشار کربن در سه حوزه اصلی رخ می دهد: فرآیند های تولید در مراکز تولید، عملیات بازیافت در مراکز بازیافت، و حمل و نقل در تمامی مسیر های جریان مستقیم و معکوس. نماد های عدم قطعیت به ترتیب نشان دهنده عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و نرخ بازگشت محصولات می باشند.

۲-۳ تشریح روش تحقیق

روش تحقیق این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، ریاضی و تحلیلی می باشد. پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت انجام شده است. برای این منظور، ابتدا با مرور ادبیات و پیشینه تحقیق، شکاف های تحقیقاتی شناسایی و سپس مدل ریاضی مناسب تدوین گردید. مدل پیشنهادی از نوع برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) دو هدفه بوده و برای مواجهه با عدم قطعیت از رویکرد بهینه سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شده است.

۳-۳ مفروضات

- مدل ریاضی ارائه شده بر اساس مفروضات زیر تدوین گردیده است:
- شبکه زنجیره تامین به صورت حلقه بسته شامل جریان مستقیم (تامین، تولید، توزیع) و جریان معکوس (جمع آوری، بازیافت، دفع) می باشد.
 - تصمیم گیری در مورد احداث تسهیلات (تولید، توزیع، جمع آوری، بازیافت) با متغیر های باینری و ظرفیت محدود هر تسهیلات مشخص می شود.
 - محصولات بازگشتی به مراکز جمع آوری وارد شده و بر اساس نرخ بازیافت به دو دسته قابل بازیافت و غیرقابل بازیافت تفکیک می شوند.
 - عدم قطعیت در دو پارامتر تقاضای مشتریان و نرخ بازگشت محصولات با رویکرد سناریو مدل سازی شده است.
 - اهداف مسئله شامل کمینه سازی هزینه های کل شبکه و کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه ای می باشد.
- پس از تعریف این مفروضات، مدل ریاضی تحقیق بر اساس آن ها فرمول بندی گردیده و در ادامه ارائه می شود.

۴-۳ تشریح مدل ریاضی

مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش، یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه است که برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت توسعه یافته است. در این مدل، دو تابع هدف به صورت هم زمان بهینه سازی می شوند: تابع هدف اول به دنبال کمینه سازی هزینه های کل شبکه شامل هزینه های حمل و نقل، هزینه های ثابت راه اندازی تسهیلات، هزینه های تولید و هزینه های بازیافت است. تابع هدف دوم میزان انتشار گاز های گلخانه ای را در کل شبکه شامل انتشار ناشی از تولید، حمل و نقل و عملیات بازیافت کمینه می کند.

برای مواجهه با عدم قطعیت در پارامتر های تقاضا و نرخ بازگشت محصولات، از رویکرد بهینه سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شده است. در این رویکرد، هر سناریو نمایانگر وضعیت متفاوتی از تقاضا و بازگشت محصولات با احتمال وقوع مشخص می باشد. تصمیمات استراتژیک (احداث تسهیلات) در مرحله اول (پیش از مشاهده سناریو ها) و تصمیمات تاکتیکی (جریان مواد) در مرحله دوم (پس از مشاهده سناریو ها) اتخاذ می شوند.

مدل پیشنهادی قادر است با ایجاد تعادل بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی، مجموعه ای از جواب های بهینه پارتو را ارائه دهد که در آن ها کاهش انتشار کربن در مقابل افزایش هزینه ها قابل ارزیابی است. این ویژگی به مدیران کمک می کند تا بر اساس استراتژی های سازمان و الزامات قانونی، مناسب ترین پیکربندی شبکه را انتخاب نمایند. در ادامه، مجموعه ها، پارامتر ها و متغیر های تصمیم معرفی می شوند و سپس تابع هدف و محدودیت های حاکم بر سیستم تولید به صورت ریاضی بیان خواهند شد.

جدول ۲- معرفی مجموعه های مدل

i	تامین کنندگان مواد اولیه	m	مراکز جمع آوری
j	مراکز تولید	n	مراکز بازیافت
k	مراکز توزیع	o	مراکز دفع
l	مشتریان	s	سناریوهای مختلف (عدم قطعیت)

جدول ۳- معرفی پارامتر های هزینه ای مدل

f_j	هزینه ثابت راه اندازی مرکز تولید i
g_k	هزینه ثابت راه اندازی مرکز توزیع k
h_m	هزینه ثابت راه اندازی مرکز جمع آوری m

هزینه ثابت راه اندازی مرکز بازیافت n	r_n
هزینه حمل هر واحد مواد اولیه از تامین کننده i به مرکز j تولید	c_{ij}
هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز تولید j به مرکز توزیع k	p_{jk}
هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز توزیع k به مشتری l	t_{kl}
هزینه حمل هر واحد محصول بازگشتی از مشتری l به مرکز جمع آوری m	q_{lm}
هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز جمع آوری m به مرکز بازیافت n	u_{mn}
هزینه حمل هر واحد محصول از مرکز جمع آوری m به مرکز دفع o	w_{mo}
هزینه حمل هر واحد مواد بازیافتی از مرکز بازیافت n به مرکز تولید j	v_{nj}

جدول ۴- معرفی پارامترهای مرتبط با ظرفیت، تقاضا و بازگشت

حداکثر مواد اولیه قابل تامین توسط تامین کننده i	$supply_i$
ظرفیت مرکز تولید j	cap_j
ظرفیت مرکز توزیع k	cap_k
ظرفیت مرکز جمع آوری m	cap_m
ظرفیت مرکز بازیافت n	cap_n
مقدار تقاضای مشتری l در سناریوی s	$demand_{ls}$
درصد محصولات بازگشتی از مشتری l در سناریوی s	$return_{ls}$
نرخ بازیافت در مرکز n	rec_rate_n

جدول ۵- معرفی پارامترهای زیست محیطی و احتمالی

e_j^p	میزان انتشار کربن به ازای هر واحد تولید در مرکز j
e_{ab}^t	میزان انتشار کربن به ازای هر واحد حمل و نقل از مرکز a به مرکز b
e_n^r	میزان انتشار کربن به ازای هر واحد بازیافت در مرکز n
$prob_s$	احتمال وقوع سناریوی s (مجموع احتمالات برابر ۱)

جدول ۶- معرفی متغیرهای تصمیم گیری

x_{ij}	مقدار مواد اولیه ارسالی از تامین کننده i به مرکز تولید j
y_{jk}	مقدار محصول ارسالی از مرکز تولید j به مرکز توزیع k
z_{kls}	مقدار محصول ارسالی از مرکز توزیع k به مشتری l در سناریوی s
r_{lms}	مقدار محصول بازگشتی ارسالی از مشتری l به مرکز جمع آوری m در سناریوی s
a_{mns}	مقدار محصول ارسالی از مرکز جمع آوری m به مرکز بازیافت n در سناریوی s
b_{mos}	مقدار محصول ارسالی از مرکز جمع آوری m به مرکز دفع o در سناریوی s
d_{njs}	مقدار مواد بازیافتی ارسالی از مرکز بازیافت n به مرکز تولید j در سناریوی s
A_j	اگر مرکز تولید j احداث شود، ۱ در غیر این صورت ۰.
B_k	اگر مرکز تولید k احداث شود، ۱ در غیر این صورت ۰.
C_m	اگر مرکز تولید m احداث شود، ۱ در غیر این صورت ۰.
D_n	اگر مرکز تولید n احداث شود، ۱ در غیر این صورت ۰.

۱-۴-۳ تابع هدف

تابع هدف اول به دنبال کمینه سازی مجموع هزینه های شبکه است.

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1 = & \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} + \sum_j \sum_k p_{jk} y_{jk} + \sum_s \text{prob}_s \left(\sum_k \sum_l t_{kl} z_{kls} + \sum_l \sum_m q_{lm} r_{lms} + \right. \\ & \left. \sum_m \sum_n u_{mn} a_{mns} + \sum_m \sum_o w_{mo} b_{mos} + \sum_n \sum_j v_{nj} d_{njs} \right) + \sum_j f_j A_j + \sum_k g_k B_k + \sum_m h_m C_m + \sum_n r_n D_n \quad (1) \end{aligned}$$

هزینه ها به سه دسته اصلی تقسیم می شوند: هزینه های حمل و نقل در سطوح مختلف زنجیره، هزینه های ثابت احداث تسهیلات، و هزینه های عملیاتی. عبارت اول و دوم هزینه های حمل در جریان مستقیم (مواد اولیه و محصولات جدید) را نشان می دهند. عبارت سوم (درون سیگمای سناریو ها) شامل هزینه های حمل در جریان معکوس و توزیع است. در نهایت، چهار عبارت آخر هزینه های ثابت احداث تسهیلات را نشان می دهند. توجه شود که هزینه های حمل و نقل در جریان معکوس و همچنین هزینه های توزیع به مشتریان، تحت تأثیر سناریو های عدم قطعیت قرار دارند و به صورت میانگین وزنی با احتمالات سناریو ها محاسبه می شوند.

تابع هدف دوم میزان کل انتشار گازهای گلخانه ای (بر حسب تن) در سراسر شبکه را کمینه می کند.

$$\begin{aligned} \text{Min } z_2 = & \sum_j e_j^p \left(\sum_k y_{jk} \right) + \sum_s \text{prob}_s \left(\sum_i \sum_j e_{ij}^t x_{ij} + \sum_j \sum_k e_{jk}^t y_{jk} + \right. \\ & \left. \sum_k \sum_l e_{kl}^t z_{kls} + \sum_l \sum_m e_{lm}^t r_{lms} + \sum_m \sum_n e_{mn}^t a_{mns} + \sum_m \sum_o e_{mo}^t b_{mos} + \sum_n \sum_j e_{nj}^t d_{njs} + \sum_n e_n^r \left(\sum_m a_{mns} \right) \right) \quad (2) \end{aligned}$$

انتشار کربن در سه حوزه اصلی رخ می دهد: فرآیند های تولید، حمل و نقل، و فرآیند های بازیافت. عبارت اول انتشار ناشی از تولید محصولات در مراکز تولید را نشان می دهد. عبارات بعدی (درون سیگمای سناریو ها) انتشار ناشی از حمل و نقل در تمامی مسیرهای جریان مستقیم و معکوس را شامل می شود. عبارت آخر نیز انتشار ناشی از عملیات بازیافت در مراکز بازیافت را نشان می دهد. مشابه تابع هدف اول، بخش هایی از انتشار که به عدم قطعیت وابسته هستند (حمل و نقل و بازیافت وابسته به سناریو)، به صورت میانگین وزنی محاسبه می شوند.

محدودیت ها ۲-۴-۳

$$\sum_j x_{ij} \leq supply_i \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_k y_{jk} \leq cap_j A_j \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_l z_{kls} \leq cap_k B_k \quad \forall k, s \quad (5)$$

$$\sum_k z_{kls} \geq demand_{ls} \quad \forall l, s \quad (6)$$

$$\sum_m r_{lms} = return_{ls} \times \sum_k z_{kls} \quad \forall l, s \quad (7)$$

$$\sum_n a_{mns} + \sum_o b_{mos} = \sum_l r_{lms} \quad \forall m, s \quad (8)$$

$$\sum_m a_{mns} \leq cap_n D_n \quad \forall n, s \quad (9)$$

$$\sum_j d_{njs} = rec_rate_n \times \sum_m a_{mns} \quad \forall n, s \quad (10)$$

$$\sum_i x_{ij} + \sum_n d_{njs} \geq \sum_k y_{jk} \quad \forall j, s \quad (11)$$

$$x_{ij}, y_{jk}, z_{kls}, r_{lms}, a_{mns}, b_{mos}, d_{njs} \geq 0 \quad (12)$$

(۱۳)

$$A_j, B_k, C_m, D_n \in \{0, 1\}$$

معادله (۳)، محدودیت ظرفیت تامین کنندگان است و تضمین می کند که مقدار کل مواد اولیه ارسالی از هر تامین کننده به تمام مراکز تولید، از حداکثر ظرفیت تامین آن تامین کننده تجاوز نکند.

معادله (۴)، محدودیت مراکز تولید است. اگر مرکز تولید احداث شود ($A_j = 1$)، مقدار کل محصولات ارسالی از این مرکز به مراکز توزیع نباید از ظرفیت آن بیشتر شود. اگر مرکز احداث نشود ($A_j = 0$)، سمت راست نامساوی صفر شده و عملاً هیچ محصولی از این مرکز قابل ارسال نیست.

مشابه محدودیت قبلی، معادله (۵)، محدودیت ظرفیت مراکز توزیع را کنترل می کند. برای هر سناریو، مقدار محصولات ارسالی از مرکز توزیع به مشتریان نباید از ظرفیت آن مرکز تجاوز کند. متغیر باینری B_k فعال بودن یا نبودن مرکز توزیع را مشخص می کند.

محدودیت (۶)، یکی از مهم ترین قیود مسئله است که تأمین رضایت مشتریان را تضمین می کند. برای هر مشتری و در هر سناریو، مجموع محصولات دریافتی از تمام مراکز توزیع باید حداقل برابر با تقاضای آن مشتری باشد. این قید به صورت نامساوی بزرگتر مساوی نوشته شده تا امکان ارسال بیش از تقاضا (در صورت وجود ظرفیت مازاد) نیز وجود داشته باشد.

محدودیت (۷)، رابطه بین جریان مستقیم و معکوس را برقرار می کند. برای هر مشتری i در سناریوی s ، مقدار کل محصولات بازگشتی برابر است با درصدی از کل محصولات ارسالی به آن مشتری. این قید نشان می دهد که چه مقدار از محصولات فروخته شده به زنجیره باز می گردند.

محدودیت (۸)، موازنه جریان را در مراکز جمع آوری تضمین می کند. برای هر مرکز جمع آوری در هر سناریو، مجموع محصولات ارسالی به مراکز باز یافت و مراکز دفع باید برابر با کل محصولات دریافتی از مشتریان باشد. این قید تضمین می کند که هیچ محصولی در مراکز جمع آوری باقی نمی ماند.

محدودیت (۹)، ظرفیت مراکز باز یافت را کنترل می کند. مقدار محصولات ارسالی به هر مرکز باز یافت از تمام مراکز جمع آوری، نباید از ظرفیت آن مرکز تجاوز کند. متغیر باینری D_n فعال بودن مرکز باز یافت را مشخص می کند.

معادله (۱۰)، بیانگر کارایی فرآیند باز یافت است. برای هر مرکز باز یافت در هر سناریو، مقدار مواد باز یافتی تولید شده برابر است با نرخ باز یافت ضربدر مقدار محصولات ورودی به مرکز باز یافت. مابقی محصولات (۱ - نرخ باز یافت) به عنوان ضایعات در نظر گرفته می شوند که قبلاً در محدودیت (۸) به مراکز دفع ارسال شده اند.

معادله (۱۱)، حلقه نهایی زنجیره حلقه بسته را تکمیل می کند. برای هر مرکز تولید در هر سناریو، مجموع مواد اولیه خریداری شده از تامین کنندگان و مواد باز یافتی دریافتی از مراکز باز یافت، باید حداقل برابر با مقدار محصولات تولیدی باشد. این قید نشان می دهد که چگونه مواد باز یافتی دوباره به چرخه تولید باز می گردند.

محدودیت (۱۲)، ماهیت فیزیکی متغیرهای جریان را نشان می دهد. مقادیر جریان مواد در تمام مسیر ها نمی توانند منفی باشند.

محدودیت (۱۳)، نوع متغیرهای تصمیم گیری استراتژیک را مشخص می کند. این متغیرها که بیانگر تصمیم های احداث یا عدم احداث تسهیلات هستند، باید مقادیر ۰ یا ۱ اختیار کنند.

۴- روش حل

با توجه به دو هدفه بودن مسئله، از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده یا AUGMECON^۱ برای حل استفاده شده است. این روش توسط ماوروتاس ارائه شد و نسبت به روش کلاسیک محدودیت اپسیلون دارای مزایایی از جمله تولید جواب های کارای قوی، کاهش زمان محاسبات و امکان کنترل تراکم جواب های پارتو می باشد [۱۵].

در این روش، ابتدا با بهینه سازی جداگانه هر یک از توابع هدف، جدول پرداخت محاسبه شده و محدوده تغییرات تابع هدف دوم $(r_2 = Z_2^* - Z_2(x^1))$ تعیین می گردد. سپس این محدوده به q_2 بازه مساوی تقسیم شده و مقادیر مختلف e_{2k} مطابق رابطه $e_{2k} = Z_2(x^1) + \left(\frac{k}{q_2}\right) \times r_2$ برای $k = 0, 1, \dots, q_2$ محاسبه می شود.

مسئله اصلی برای هر مقدار e_{2k} حل می شود. استراتژی خروج زودهنگام نیز باعث می شود به محض غیرموجه شدن یک مسئله، فرآیند حل متوقف گردد. پس از تولید مجموعه جواب های پارتو، برای انتخاب بهترین جواب از رویکرد تصمیم گیری فازی زیمرمن (۱۹۷۸) استفاده می شود [۱۶].

۵- تحلیل نتایج

مدل پیشنهادی برای یک شبکه زنجیره تامین لوازم الکترونیکی شامل ۲ تامین کننده، ۳ مرکز تولید بالقوه، ۴ مرکز توزیع بالقوه، ۵ بازار مصرف، ۲ مرکز جمع آوری بالقوه و ۲ مرکز بازیافت بالقوه پیاده سازی شده است. این ساختار شبکه با مطالعات مشابه در الکترونیک همخوانی دارد.

۱-۵ تعریف سناریو های عدم قطعیت

با توجه به رویکرد سناریو در مدل سازی عدم قطعیت، سه سناریو برای تقاضا و نرخ بازگشت محصولات تعریف شده است:

سناریوی خوش بینانه با احتمال ۳۰٪، تقاضای بالا (۲۰٪ بیش از سطح پایه) و نرخ بازگشت مطلوب (۲۵٪). سناریوی محتمل با احتمال ۵۰٪، تقاضای متوسط (سطح پایه) و نرخ بازگشت متوسط (۱۸٪). سناریوی بدبینانه (احتمال ۲۰٪، تقاضای پایین (۲۰٪ کمتر از سطح پایه) و نرخ بازگشت ضعیف (۱۲٪).

۲-۵ نتایج بهینه سازی دوهدفه

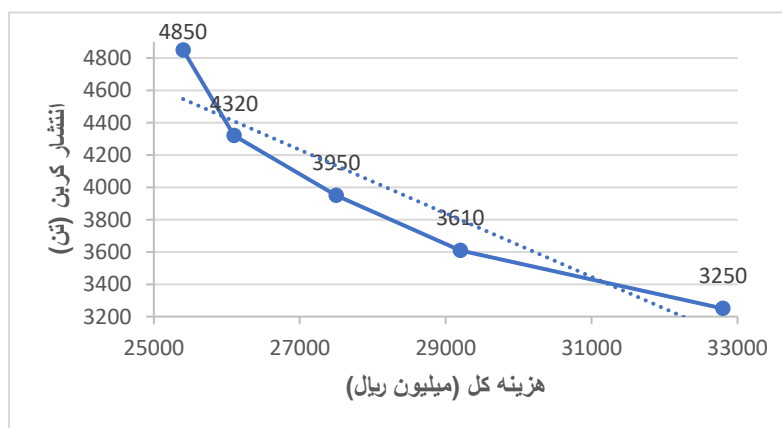
مدل با استفاده از نرم افزار GAMS و حل کننده CPLEX و با روش محدودیت اپسیلون تقویت شده حل شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش وزن هدف زیست محیطی (یعنی سخت گیری بیشتر در محدودیت اپسیلون)، هزینه های کل افزایش یافته اما میزان انتشار کربن کاهش می یابد که بیانگر وجود رابطه تضاد بین دو هدف می باشد.

¹ Augmented Epsilon-Constraint Method

جدول ۷- نتایج حاصل از روش محدودیت اپسیلون برای جواب‌های پارتو

شماره جواب	تابع هدف اول (هزینه کل - میلیون ریال)	تابع هدف دوم (انتشار کربن - تن)	درصد افزایش هزینه نسبت به جواب ۱	درصد کاهش کربن نسبت به جواب ۱
۱	۲۵۴۰۰	۴۸۵۰	—	—
۲	۲۶۱۰۰	۴۳۲۰	٪۲.۸+	٪۱۰.۹+
۳	۲۷۵۰۰	۳۹۵۰	٪۸.۳+	٪۱۸.۶+
۴	۲۹۲۰۰	۳۶۱۰	٪۱۵.۰+	٪۲۵.۶+
۵	۳۲۸۰۰	۳۲۵۰	٪۲۹.۱+	٪۳۳.۰+

شکل ۲ رابطه معکوس بین هزینه کل و انتشار کربن را نشان می‌دهد. با افزایش هزینه (حرکت به سمت راست)، میزان انتشار کربن کاهش می‌یابد. نقطه ۱ کمترین هزینه و بیشترین انتشار و نقطه ۵ بیشترین هزینه و کمترین انتشار را داراست.



شکل ۲ - جبهه پارتو (Pareto Front) حاصل از اجرای مدل

۳-۵ تحلیل حساسیت

۱-۳-۵ تحلیل حساسیت بر روی نرخ بازیافت

تحلیل حساسیت بر روی پارامتر نرخ بازیافت در مراکز بازیافت انجام شده است. نتایج این تحلیل در جدول ۸ و شکل ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۸- نتایج تحلیل حساسیت بر روی نرخ بازیافت

سناریو	نرخ بازیافت	هزینه کل (میلیون ریال)	انتشار کربن (تن)	تغییر هزینه	تغییر انتشار
پایه	۵۰٪	۲۷۵۰۰	۳۹۵۰	—	—
سناریو ۱	۶۰٪	۲۸۶۰۰	۳۶۷۴	٪ ۴.۰+	٪ ۷.۰-
سناریو ۲	۷۰٪	۲۹۷۴۰	۳۴۱۶	٪ ۸.۱+	٪ ۱۳.۵-
سناریو ۳	۸۰٪	۳۰۹۳۰	۳۱۷۸	٪ ۱۲.۵+	٪ ۱۹.۵-

همانگونه که در جدول ۸ و شکل ۳ مشاهده می شود، به ازای هر ۱۰٪ افزایش در نرخ بازیافت، هزینه های کل به طور متوسط ۴٪ افزایش و انتشار کربن ۷٪ کاهش می یابد. این یافته ها با نتایج مطالعات مشابه در زمینه بازیافت محصولات الکترونیکی همخوانی دارد و نشان دهنده مقرون به صرفه بودن سرمایه گذاری در فناوری های بازیافت در بلندمدت است.



شکل ۳- تحلیل حساسیت هزینه و انتشار کربن نسبت به تغییرات نرخ بازیافت

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک مدل ریاضی دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت و انتشار کربن ارائه شد. مدل پیشنهادی از نوع برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط بوده و با رویکرد بهینه سازی استوار مبتنی بر سناریو، عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و نرخ بازگشت محصولات را پوشش می دهد. دو تابع هدف شامل کمینه سازی هزینه های کل شبکه و کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه ای به صورت هم زمان بهینه سازی شده اند. نتایج مطالعه موردی در صنعت لوازم الکترونیکی نشان داد که بین کاهش هزینه ها و کاهش انتشار کربن یک رابطه متضاد وجود دارد. به عبارت دیگر، دستیابی به سطوح پایین تر انتشار کربن مستلزم افزایش هزینه های کل شبکه می باشد.

جبهه پارتو حاصل از اجرای روش محدودیت اِپسیلون تقویت شده (AUGMECON) مجموعه ای از جواب های بهینه را ارائه داد که مدیران می توانند بر اساس استراتژی های سازمان و الزامات قانونی، مناسب ترین پیکربندی شبکه را از میان آن ها انتخاب کنند.

تحلیل حساسیت بر روی نرخ بازیافت نشان داد که افزایش ۱۰٪ در نرخ بازیافت منجر به کاهش ۷٪ انتشار کربن و افزایش ۴٪ هزینه های کل می گردد. این یافته مؤید آن است که سرمایه گذاری در فناوری های بازیافت اگرچه در کوتاه مدت هزینه بر است، اما در بلند مدت با کاهش انتشار کربن و بهبود پایداری زیست محیطی همراه بوده و از توجیه اقتصادی مناسبی برخوردار می باشد.

همچنین نتایج نشان داد که طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با یکپارچه سازی جریان های مستقیم و معکوس، علاوه بر کاهش هزینه ها از طریق استفاده مجدد از مواد، به کاهش اثرات مخرب زیست محیطی نیز کمک شایانی می کند. این یافته ها با نتایج پژوهش های پیشین در زمینه زنجیره تامین پایدار همخوانی دارد.

۱-۶ محدودیت های پژوهش

این پژوهش با وجود دستاورد های قابل توجه، با محدودیت هایی نیز مواجه بوده است. نخست آنکه به دلیل محدودیت در دسترسی به داده های واقعی صنعت لوازم الکترونیکی، از داده های شبیه سازی شده برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید که ممکن است تمام پیچیدگی های دنیای واقعی را پوشش ندهد.

دوم آنکه در مدل سازی عدم قطعیت، تنها دو منبع اصلی یعنی تقاضای مشتریان و نرخ بازگشت محصولات در نظر گرفته شده و از سایر منابع عدم قطعیت مانند نوسانات قیمت مواد اولیه، نرخ ارز، یا ریسک های اختلال در زنجیره تامین صرف نظر شده است.

سوم آنکه در این پژوهش، هزینه ها و توابع هدف به صورت خطی فرمول بندی شده اند، در حالی که در عمل ممکن است برخی هزینه ها مانند هزینه های حمل و نقل یا هزینه های تولید رفتار غیرخطی داشته باشند. همچنین مدل ارائه شده تک دوره ای بوده و تصمیم گیری های چند دوره ای و پویایی های زمانی را پوشش نمی دهد. در نهایت، فرض تک محصولی بودن شبکه، کاربرد مدل را برای صنایع با محصولات متنوع محدود می سازد.

۲-۶ تحقیقات آتی

بر اساس یافته ها و محدودیت های پژوهش حاضر، چندین مسیر برای تحقیقات آتی قابل پیشنهاد است. نخست آنکه محققان می توانند مدل ارائه شده را با در نظر گرفتن فناوری های نوین مانند بلاک چین توسعه دهند، زیرا این فناوری با ایجاد شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره تامین، می تواند به بهبود عملکرد زیست محیطی و کاهش عدم تقارن اطلاعاتی کمک کند.

دوم آنکه استفاده از رویکرد های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی برای پیش بینی دقیق تر پارامتر های غیرقطعی نظیر تقاضا و نرخ بازگشت می تواند دقت مدل را افزایش داده و تصمیم گیری های بهتری را ممکن سازد. سوم آنکه گسترش مدل به حالت چند محصولی و چند دوره ای، آن را به شرایط واقعی نزدیک تر کرده و کاربرد پذیری آن را در صنایع با محصولات متنوع افزایش می دهد.

چهارم آنکه در نظر گرفتن اهداف اجتماعی مانند ایجاد اشتغال، توسعه پایدار و مسئولیت اجتماعی در کنار اهداف اقتصادی و زیست محیطی می تواند به طراحی زنجیره های تامین پایدارتر کمک کند. در نهایت، با توجه به ابعاد بزرگ مسائل دنیای واقعی، استفاده از الگوریتم های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی ازدحام ذرات یا الگوریتم های ترکیبی می تواند راهگشای حل مسائل در ابعاد وسیع تر باشد.

۷- مراجع

1. Farahani, R. Z., & Elahipanah, M. (2020), "A Genetic Algorithm to Optimize the Total Cost in a Green Supply Chain Network," *Computers & Industrial Engineering*, 145 (1), pp 106-122.
2. Papadopoulos, T., & Balta, M. E. (2021), "The Role of Big Data in Explaining Environmental Performance in Supply Chains," *International Journal of Production Economics*, 235 (3), pp 108-125.
3. Benjaafar, S., Li, Y., & Daskin, M. (2012), "Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(1), pp 99-116.
4. Mardan, E., Govindan, K., Mina, H., & Gholami-Zanjani, S. M. (2019), "An Accelerated Benders Decomposition Algorithm for a Bi-Objective Green Closed Loop Supply Chain Network Design Problem," *Journal of Cleaner Production*, 235, pp 1499-1514.
5. Yavari, M., & Zaker, H. (2018), "An Integrated Two-Layer Network Model for Designing a Resilient Green-Closed Loop Supply Chain of Perishable Products under Disruption," *Journal of Cleaner Production*, 230, pp 198-218.
6. Lotfi, R., Mehrjerdi, Y. Z., Pishvae, M. S., Sadeghieh, A., & Weber, G. W. (2020), "A Robust Optimization Model for Sustainable and Resilient Closed-Loop Supply Chain Network Design Considering Conditional Value at Risk," *Numerical Algebra, Control and Optimization*, 11(2), pp 221-253.
7. Wube, W., Berhan, E., & Tesfaye, G. (2025), "Decision Support Systems for a Resilient and Sustainable Closed Loop Supply Chain under Risk: A Systematic Review and Future Research Directions," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 100217.
8. Pishvae, M. S., & Razmi, J. (2012), "Environmental Supply Chain Network Design Using Multi-Objective Fuzzy Mathematical Programming," *Applied Mathematical Modelling*, 36 (8), pp 3433-3446.
9. Fazli-Khalaf, M., Mirzazadeh, A., & Pishvae, M. S. (2017), "A Robust Fuzzy Stochastic Programming Model for the Design of a Reliable Green Closed-Loop Supply Chain Network," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(8), pp 2119-2149.
10. Abdolazimi, O., Esfandarani, M. S., & Shishebori, D. (2020), "Robust Design of a Multi-Objective Closed-Loop Supply Chain by Integrating On-Time Delivery, Cost, and

Environmental Aspects, Case Study of a Tire Factory," Journal of Cleaner Production, 264, 121566.

11. Bertsimas, D., & Sim, M. (2004), "The price of robustness," Operations Research, 52(1), pp 35-53.

12. Cheng, J., Liao, L., Lu, S., Sun, T., & Wu, P. (2025), "Effective MILP and Matheuristic for Multi-Echelon Green Supply Chain Operations and Financing Considering Carbon Emission Reduction Investment," Journal of Cleaner Production, 493, 144816.

13. Yuniarti, R., Suparno, & Arvitrida, N. I. (2025), "A Scoping Review and Bibliometric Analysis of Sustainable and Resilient Supply Chain Network Design," Supply Chain Analytics, 12, 100162.

14. Li, X., et al. (2025), "Robust Optimization of Uncertain E-commerce Closed-Loop Supply Chain Networks under Carbon Policies," Journal of Cleaner Production (In Press).

15. Mavrotas, G. (2009), "Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems," Applied Mathematics and Computation, 213(2), pp 455-465.

16. Zimmermann, H.J. (1978), "Fuzzy programming and linear programming with several objective functions," Fuzzy Sets and Systems, 1(1), pp 45-55.